А. И. ИЛЬЕНКО Д. А. КРИВОЛУЦКИЙ

РАДИОЭКОЛОГИЯ



1971 · СЕРИЯ
Новое в жизни науке технике
7
БИОЛОГИЯ

А. И. ИЛЬЕНКО, Д. А. КРИВОЛУЦКИЙ,
кандидаты биологических наук

РАДИОЭКОЛОГИЯ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»
Москва 1971

57.026
И 45

Ильенко А. И., Криволуцкий Д. А.

И 45 Радиоэкология. М., «Знание», 1971. 32 стр. («Новое в жизни, науке и технике». Серия «Биология», 14).

Авторы рассказывают о задачах радиоэкологии, о путях миграции радиоактивных изотопов в природе. Наибольшее внимание уделено действию радиоактивного загрязнения внешней среды, на отдельные особи, популяции и сообщества животных и растений. Рассмотрены вопросы действия ионизирующих излучений на процессы эволюции живых организмов и методы защиты от поступления радионуклидов в продукты питания человека.

2-10-2 57.026

СОДЕРЖАНИЕ

Андрей Иванович Ильенко и
Дмитрий Александрович Криволуцкий

РАДИОЭКОЛОГИЯ

Редактор *И. М. Тужилина*
Художник *Н. Левянт*
Худож. редактор *Т. И. Добровольнова*
Техн. ред. *Т. В. Самсонова*
Корректор *И. И. Поршнева*

А 01832. Сдано в набор 31/III-1971 г. Подписано к печати 17/VI-1971 г. Формат бумаги 60×90/16. Бумага типографская № 3. Бум. л. 1,0. Печ. л. 2,0. Уч.-изд. л. 1,85. Тираж 60 800 экз. Издательство «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4. Заказ 768. Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.
Цена 6 коп.

ВВЕДЕНИЕ

Как бы далеко в прошлое человеческой истории мы ни заглянули, всегда можно встретить факты бесхозяйственного, а порой и преступно небрежного отношения людей к среде, в которой им приходилось жить. На заре цивилизации население было еще слишком малочисленным, чтобы нанести природе непоправимый вред даже в ограниченных районах, но по мере развития производительных сил масштабы воздействия человека на окружающий его мир увеличивались. Люди не сразу пришли к убеждению, что богатства природы не беспредельны, а возможность хищнической эксплуатации естественных богатств может обернуться довольно неприятными последствиями, хотя с такими явлениями пришлось столкнуться уже жителям Древнего мира. За свою неопытность им пришлось расплачиваться сокращением площади лесов, эрозией и потерей плодородия почв, образованием огромных площадей развеваемых ветром песков. Со временем необходимость оберегать леса, чистоту рек, бороться с эрозией пахотных земель стала очевидной, и люди начали делать практические выводы. Однако пропорционально знаниям и могуществу человека росли и его возможности, не желая того, причинять себе вред.

Развитие промышленности, химизация сельского хозяйства создали угрозу насыщения биосферы промышленными отходами и искусственными химическими соединениями в количествах, небезразличных для растительности, животного мира да и для самого человека (особенно в отношении ядовитых веществ и канцерогенов). Сейчас уже разработаны и широко применяются эффективные методы очистки выбрасываемых промышленностью загрязненных вод и газов, осознан вред от неразумного применения ядохимикатов, удобрений и гербицидов. Но в то же время на горизонте возник призрак новой опасности, настолько серьезной, что внимание ей стали уделять (может быть, впервые за всю историю) еще до того, как она привела к катастрофическим последствиям. Речь идет о радиоактивном загрязнении биосферы.

Возможность использования практически неисчерпаемых запасов атомной энергии — едва ли не самое яркое достижение науки XX века.

Вскоре после открытия А. А. Беккерелем и М. Кюри явления естественной радиоактивности было замечено, что этот вид излучения вызывает выпадение волос и плохо заживающие ожоги. Несчастные случаи у рабочих, занятых изготовлением и работой со светящимися красками, в состав которых входил радий, а также у горняков урановых разработок предупреждали о необходимости осторожного обращения с радиоактивными веществами. В 20-е годы некоторые врачи увидели в радиевых препаратах универсальное средство для лечения всех трудных случаев и стали назначать их больным, страдающим различными заболеваниями, начиная от нарушений психики и работы сердца и кончая сифилисом. Понадобилось несколько смертных случаев среди пациентов, чтобы охладить энтузиазм врачей.

Загрязнение биосферы искусственными радиоактивными веществами началось во время второй мировой войны в период создания мощных реакторов, испытания, а затем и применения ядерного оружия. «Грибы» атомных взрывов над Хиросимой и Нагасаки давно рассеялись, но в Японии и по сей день умирают от лучевой болезни люди, ставшие невольными свидетелями этих катастроф.

Рассеивание в атмосфере, водах морей и океанов, проникновение в почву продуктов радиоактивного распада после испытаний атомных бомб, их накопление в сельскохозяйственной продукции и промысловых рыбах вызвали серьезную тревогу мировой общественности.

Эти опасения связаны не только с угрозой развязывания атомной войны, после которой, по мнению авторитетных специалистов, может не быть ни победителей, ни побежденных, ибо человек, возможно, не сохранит способность к выживанию в обстановке, которая сложится после войны из-за колоссальных разрушений и опустошительного загрязнения биосферы радиоизотопами. Несомненную опасность будет представлять и радиоактивность, накопленная организмами на загрязненных территориях.

Угроза дальнейшего прогрессирующего загрязнения биосферы нуклидами была значительно уменьшена подписанием большинством государств в 1963 г. в Москве договора о запрещении испытаний ядерного оружия в трех средах (атмосфере, под водой и в космосе). Но ведь значительные количества радиоактивных веществ — отходов атомной промышленности — постоянно выносятся во внешнюю среду, причем многие страны сбрасывают в моря и океаны необработанные отходы атомной промышленности. Попавшие в биосферу радиоактивные вещества раньше или позже разносятся на ог-

ромные расстояния, а поэтому загрязнение внешней среды радионуклидами представляет угрозу для всего человечества.

В настоящее время успехи ядерной энергетики позволяют полагать, что в ближайшие годы электростанции на ядерном горючем по стоимости энергии догонят обычные тепловые установки.

Вдохновляющие перспективы открываются перед ядерной энергетикой в наши дни. В Отчетном докладе ЦК КПСС XXIV съезду КПСС уделено немало внимания необходимости быстрыми темпами развивать получение электроэнергии от мощных электростанций на ядерном горючем, особенно в районах, бедных топливными ресурсами. В Директивах на девятую пятилетку записано: «Предусмотреть значительное развитие атомной энергетики путем строительства крупных электростанций с установкой реакторов единичной мощностью 1 млн. киловатт и выше. Ввести в действие мощности на атомных электростанциях в размере 6—8 млн. киловатт». Такие станции в 1971—1975 гг. будут построены под Ленинградом, на Кольском полуострове, на Чукотке, несколько атомных станций будет действовать на Украине.

Первые же сообщения о колоссальной, фантастической для современников мощности ядерных взрывных устройств вызвали самый живой интерес у инженеров-строителей. Это и понятно, ведь мощными взрывами можно с минимальными затратами создавать плотины и водохранилища, прокладывать дороги сквозь неприступные горы, проводить вскрышные работы на месторождениях полезных ископаемых. Большой интерес вызвали также сообщения о разработке проектов создания атомными взрывами удобных бухт в районах, где отсутствуют подходящие естественные заливы и гавани. Применение в СССР подземных ядерных взрывов при эксплуатации нефтяных месторождений показало их большую эффективность. При соблюдении определенных условий уровень техники уже сейчас позволяет осуществлять подземные взрывы в рамках общепризнанных норм защиты населения от излучений.

Применение радиоактивных веществ и случаи крайне вредного воздействия радиации на человека послужили причиной возникновения новой науки — радиобиологии. Главная задача радиобиологов — изучение влияния радиации на клеточные образования, клетки, ткани и целые живые организмы, разработка методов защиты от радиации. В смежных областях науки выделилось несколько более частных направлений. Таковы: **радиогигиена** — область санитарных знаний, задачей которой является отработка способов защиты человека от воздействия радиации, определение предельно допустимых уровней загрязнения среды и продуктов питания; **радиотоксикология**, сферу интересов которой составляет нахож-

дение степени поражаемости разных органов и тканей радиоактивными веществами и химическими соединениями, в состав которых они входят, а также выяснение механизма поражения. Изучением миграции радионуклидов на поверхности Земли занята **радиационная геохимия**.

Самостоятельным направлением представляется здесь и **радиоэкология**, задача которой — выяснение путей миграции и закономерностей накопления радионуклидов в биогеоценозах (это направление называют также **радиационной биогеоценологией**), а также познание закономерностей изменения сообществ и популяций организмов, обитающих в условиях повышенного фона ионизирующей радиации.

Термин «радиоэкология» был одновременно и независимо предложен советским экологом доктором биологических наук А. А. Передельским и американским профессором Е. П. Одумом.

Выдающуюся роль в развитии представлений о роли радиоактивных веществ в жизни организмов и закономерностях их миграции в биосфере сыграли труды основоположника биогеохимии академика В. И. Вернадского и его учеников.

Радиоэкология — одна из прикладных ветвей экологии, но для нее характерно комплексное, многоплановое исследование, в котором тесно переплетены методы работы геохимика или агрохимика, радиобиолога, дозиметриста, зоолога и ботаника. Во многих исследованиях нельзя обойтись без привлечения данных генетики, цитологии и биохимии, не говоря уже о работах производственного направления, выполняемых совместно со специалистами сельского, лесного или рыбного хозяйства.

Несколько слов об общей экологии и ее задачах. Экология — наука об отношениях живых организмов друг с другом и со средой обитания. Она возникла давно, но термин «экология» (от греческих «ойкос» — жилище, местопребывание и «логос» — наука) впервые был предложен выдающимся немецким биологом Э. Геккелем в 1869 г. Сейчас экология — сложившаяся биологическая дисциплина со своими методами работы и четко ограниченной сферой деятельности, которая, естественно, подразделяется на несколько более узких направлений. Из них главные: а) *экология особей,* занимающаяся изучением реакций отдельных организмов на воздействия среды; в некоторых вопросах этот раздел тесно соприкасается с физиологией; б) *экология популяций,* главное внимание уделяющая структуре и динамике популяций — основной формы существования вида в природных условиях; в) *экология биоценозов,* объектом которой являются сообщества организмов, закономерности их структуры и изменений; г) *эволюционная экология*, выделенная в качестве самостоятельного направления советским ученым С. А. Северцовым,

рассматривает закономерности эволюционных преобразований в зависимости от особенностей экологии организмов (положение в цепях питания, стабильность и защищенность занимаемой экологической ниши, роль внутривидовых отношений в формировании конгруэнтных[1] структур, особенности эволюции биоценоза, в котором существует вид и т. д.). В подавляющем большинстве случаев экологам приходится решать конкретные практические вопросы: задачи повышения продуктивности угодий, воспроизводство и повышение поголовья ценных животных, а также борьба с вредителями сельского и лесного хозяйства, пути ликвидации очагов природноочаговых инфекций и многое другое. В ряду этих важных направлений достойное место должна занять и радиоэкология, дальнейшие исследования в которой интересно вести по тем же направлениям, что уже выработаны общей экологией.

Несмотря на сравнительно молодой «возраст» радиоэкологии, она представляет собой направление с разработанными методами, подходами и идеями. Основной задачей, поставленной жизнью перед радиоэкологами, была разработка основ предвидения последствий радиоактивного загрязнения местности и изыскание эффективных путей борьбы с ними. Здесь нужны предложения по максимальному ослаблению и локализации загрязнения среды, предотвращению миграций радионуклидов по цепям питания к человеку и сельскохозяйственным животным. Появление нового сильного абиотического фактора, каким является радиация, может вызвать значительные изменения в структуре сообществ и экологии отдельных видов. Для некоторых видов радиация губительна, и они исчезают из биоценоза (из деревьев особенно радиочувствительной породой оказалась сосна), другие же легко с ней мирятся и даже возрастают в количестве. Третьи виды изменяют свою численность из-за изменения количества двух первых видов, например, хищники и паразиты, связанные с радиочувствительными видами, служащими им объектом питания, могут выпасть из сообщества.

В противоположность большинству других абиотических факторов, таких, как температура, свет, влажность, ионизирующая радиация воздействует на биоценоз от аккумулированных радиоактивных элементов с относительным постоянством в течение долгого времени.

На первых порах в радиоэкологических исследованиях выделяли три основных направления:

1) определение качественного и количественного содержания радиоактивных элементов в организмах;

---

[1] Конгруэнтные — соразмерные, совпадающие, соответствующие.

2) определение коэффициентов накопления радиоизотопов доминирующими видами;

3) выявление биологического действия инкорпорированных[1] радионуклидов при разных уровнях радиоактивности среды.

Очевидно, все эти задачи являются необходимой составной частью любого радиоэкологического исследования, но они все целиком относятся к области радиоэкологии особей.

На современном этапе развития радиоэкологии все большее внимание привлекает изучение закономерностей изменения структуры и динамики популяций и сообществ живых организмов в условиях действия радиации, выяснение механизмов адаптации животных и растений к действию ионизирующей радиации.

Методы работы радиоэколога разнообразны. Это и использование радиационных полей, создаваемых специально для изучения воздействия радиации с источниками рентгеновского или гамма-излучения, исследования в зонах вокруг реакторов с воздушной защитой, работающих в импульсном режиме, а также на полигонах для испытаний ядерного оружия и в районах повышенного содержания естественных радионуклидов или более высокого фона ионизирующего излучения.

Ионизирующие излучения не всегда оказывают отрицательное влияние на организмы. В малых дозах они могут вызывать у растений повышение роста, скорости развития и урожайности (явление радиостимуляции). При этом дочернее поколение развивается нормально. Радиостимуляция как хозяйственный прием особенно перспективна для применения в условиях короткого вегетационного периода, например, на севере или в районах с длительным засушливым периодом, а также в районах, где наблюдаются большие потери сельскохозяйственной продукции от вредителей.

Наличие аккумулированных радионуклидов в отдельных компонентах биогеоценоза, их передвижение по цепям питания, накопление в отдельных звеньях позволяют выявить многие интересные стороны жизни отдельных видов и их сообществ, взаимоотношения видов друг с другом. Выяснить пищевые связи, скорость круговорота веществ и поток энергии в биоценозе при наличии меченых объектов несравненно легче. Именно по этой причине радиоэкология привлекает сейчас внимание биологов, далеких по своим интересам от ее прикладных аспектов, но полагающих, что на этом пути можно будет значительно расширить арсенал средств полевой экологии и легче проникать во многие, неизведанные еще, тайны природы.

---

[1] Инкорпорирование — включение, объединение.

НЕМНОГО О РАДИОАКТИВНОМ РАСПАДЕ И РАДИОАКТИВНОСТИ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

Большинство природных элементов состоит из смеси нескольких изотопов, атомы которых отличаются количеством нейтронов и вследствие этого массой и массовым числом. Радиоактивные изотопы неустойчивы, хотя и в разной степени; выделяя энергию и элементарные частицы, они переходят в новое, стабильное состояние.

Радиоактивный распад носит вероятностный характер, он подчиняется статистическим законам: нельзя заранее сказать, когда распадется то или иное ядро, но можно точно вычислить, какое количество вещества распадается за любое время. Скорость распада выражают периодом полураспада T (время, в течение которого распадается половина атомов) и константой полураспада λ (доля атомов, распадающихся в одну секунду). Константа распада связана с периодом полураспада соотношением $T = \frac{693}{\lambda}$.

Периоды полураспада у разных изотопов сильно разнятся (табл. 1).

Таблица 1

Радионуклид	T	Радионуклид	T
Уран-238	$4{,}5 \cdot 10^9$ лет	Кальций-45	152 дня
Углерод-14	5570 лет	Прометий-147	2,6 лет
Торий-230	$9{,}0 \cdot 10^4$ лет	Кобальт-60	5,2 года
Радий-226	1622 года	Фосфор-32	14,3 дня
Цезий-137	30 лет	Иттрий-91	57 дней
Стронций-90	27,7 лет	Ниобий-95	35 дней
Тритий-3	12,3 года	Калий-40	$1{,}3 \cdot 10^9$ лет
Железо-55	2,9 лет	Натрий-24	15 часов

Из 189 известных радионуклидов радиэкологов интересуют примерно 20. Различают природные или естественные радионуклиды и искусственные, появление которых во внешней среде вызвано деятельностью человека.

Вылетающие при радиоактивном распаде из ядра частицы или кванты электромагнитного излучения обладают запасом энергии, которая расходуется на ионизацию и возбуждение встречных атомов или молекул. Такие излучения называют ионизирующими. Протоны, альфа (α)- и бета (β)-частицы производят ионизацию самостоятельно, их называют непосредственно ионизирующими частицами. Нейтроны, гамма (γ)- и рентгеновы лучи сами не вызывают ионизации, но, возбуждая атомы веществ, заставляют их выделять непосредственно ионизирующие частицы. Поэтому нейтроны и элек-

тромагнитное излучение называют косвенно ионизирующим излучением.

Мерой действия радионуклидов на среду является их активность, выражающая число распадов в препарате за единицу времени. Поскольку скорость распада разных радионуклидов неодинакова, равная активность может быть у веществ, содержащихся в неодинаковых количествах. Например, почти одинакова активность трех тонн урана-238, 1 *г* радия и 10 *мг* радиоактивного иода. За единицу активности принята *кюри* — единица, соответствующая распаду $3{,}7 \cdot 10^{10}$ ядер в секунду.

Биологическое действие радиоактивных излучений, их влияние на живые организмы, в том числе и на человека, являются одной из основных причин пристального внимания к этому явлению. При облучении человека значительной дозой заметное действие обнаруживается уже в первые дни. Для человека 100—200 *рад* не представляют большой опасности и вызывают незначительные изменения, 400—600 *рад* приводят к смерти 50% облученных людей. Доза выше 1000 *рад* приводит к смерти почти всех пострадавших.

В природе организмы подвергаются воздействию излучений от естественных источников и от источников, связанных своим происхождением с деятельностью человека (рис. 1).

Естественная радиоактивность обусловлена наличием естественных радионуклидов в биосфере и космическим излучением. Доза ионизирующего излучения от естественных источников порядка 0,1—0,5 *рад* в год действовала на организмы во все времена их существования и поэтому не вызывает регистрируемого биологического эффекта.

Искусственная радиоактивность обусловлена разными причинами. При переработке урановых руд образуются жидкие отходы, которые в США, например, часто сбрасывали в реки. При эксплуатации реакторов с воздушным охлаждением в воздухе появляется радиоактивный аргон (за счет нейтронной активации его атомов). В процессе работы реакторов с водяным охлаждением радиоактивность возникает за счет нейтронной активации минеральных загрязнений и продуктов коррозии, веществ, добавляемых в воду для снижения коррозии, механизмов подачи воды и стенок реакторов, а также растворенного в воде кислорода и азота. Загрязнение среды может возникнуть и при авариях реакторов, происходящих по самым разным причинам. Основная масса радионуклидов искусственного происхождения попадает в биосферу в результате ядерных взрывов.

Различают локальные и глобальные загрязнения после атомных взрывов. В первом случае частицы, поднятые в тропосферу, выпадают в течение первых нескольких суток неподалеку от места взрыва. Локальные загрязнения могут охва-

Рис. 1. Схема основных путей миграции искусственных радионуклидов из внешней среды в организм человека.

Таблица 2

Действие ионизирующих излучений в биосфере
(по Р. Б. Плэтту, 1963 г. с изменениями)

Источник	Тип излучения	Продолжительность излучения	Доза во внешней среде	Вторичная наведенная активность	Площадь, подверженная действию излучения	Прямые эффекты	Включение радионуклидов в биологический круговорот
Естественная (фоновая) радиация	α, β, γ	Миллиарды лет	0,1—0,5 *рад/год*	Нет	Вся Земля	Нет	Есть
Сброс радиоактивных отходов	α, β, γ	Непрерывное	Выше фоновой	Нет	Сотни гектаров	Нет	Есть
Аварии	α, β, γ	Острое	До нескольких тысяч *рад/час*	Нет	Несколько гектаров	Есть	Нет
Ядерные испытания	α, β, γ	Острое	До нескольких миллионов *рад/час*	Есть	Сотни *км*^{2}	Есть	Есть
Радиоактивные осадки после аварий и ядерных испытаний	α, β, γ	Хроническое, тысячи лет	Несколько фоновых	Нет	Вся Земля	Нет	Есть
Радиоактивные осадки в ядерной войне	α, β, γ	Хроническое, тысячи лет	До нескольких *рад/час*	Нет	Вся Земля	Есть	Есть


Рис. 2. Содержание Sr^{90} в почве по определениям в период исследований в 1963 и начале 1964 г. в *мкюри/миля*^{2}.

тывать площадь в сотни квадратных километров, конфигурация которой зависит от направления и силы ветра. Загрязнение местности в районе воздушного взрыва очень значительно. При глобальном загрязнении мельчайшие частицы, инжектированные в стратосферу («стратосферный резервуар»), выпадают в течение многих месяцев и даже лет. Частицы довольно быстро разносятся воздушными потоками по всей Земле. В Европе, например, появление продуктов деления после испытаний в США и в Тихом океане регистрировали через 10—12 дней после взрывов (рис. 2).

Радиоактивные осадки из глобальных выпадений (в основном с дождевой водой) не создают опасных для человека уровней загрязнения. Их распределение неравномерно, так как сильно зависит от количества выпадающих в данной точке поверхности атмосферных осадков. Доза от глобальных выпадений достигает 0,5—5 *мкр/час,* что не превышает дозы от естественных радиоактивных элементов (табл. 2).

РАДИОЭКОЛОГИЯ ОСОБЕЙ

Эта область экологии выясняет механизм и последствия воздействия факторов среды на индивидуальный организм, а приемы исследования здесь во многом напоминают работу физиолога.

Пути поступления продуктов радиоактивного деления в организмы

Основным источником поступления продуктов радиоактивного распада в организм сухопутных животных является пища, содержащая радиоактивные элементы. Не все продукты радиоактивного деления резорбируются в кишечнике в одинаковой степени. В желудочно-кишечном тракте, например, аккумулируется иттрия-91, ниобия и циркония-95, церия-144 лишь около 0,05%; рутения-103, 106—не более 5%; очень быстро всасывается в стенки кишечника цезий-137.

В организм человека радиоактивные стронций и цезий поступают главным образом из молока и молочных продуктов, изредка с растительной пищей. Поступление с водой не превышает 10% от общего количества, накопленного организмом.

Продукты радиоактивного деления в тело сухопутных животных могут проникать и через кожу, особенно если радионуклиды находятся в водных растворах. У водных животных большую роль в проникновении продуктов радиоактивного деления из внешней среды в тело играют органы осмотической регуляции (кожа, жабры и плавники у рыб), хотя и путь поступления с пищей не теряет своего значения.

Большое влияние на степень поглощения продуктов радиоактивного деления оказывает химический состав корма для сухопутных животных или воды для водных организмов. Например, с увеличением концентрации стабильного цинка в корме животных уменьшается резорбция цинка-65 в желудочно-кишечном тракте. Корм, богатый кальцием, снижает поступление стронция-90, а снижение кальция в пище увеличивает аккумуляцию стронция.

У холоднокровных животных накопление радионуклидов возрастает с увеличением температуры окружающей среды.

Установлено значение каждого из каналов загрязнения и для растений. В первые годы после ядерных взрывов значительная часть радионуклидов поступает через листья. В Англии, например, только 20% радиостронция, обнаруженного в молоке коров, поступило в корм через корневое питание растений, а 80% было усвоено через листву и из дернины. В США в 1959 г. подсчитали, что 90% радиостронция в зерне пшеницы было накоплено через листву. В последующие годы в связи с резким сокращением ядерных взрывов в атмосфере и постоянным истощением стратосферного резервуара радионуклидов относительно большее значение приобрел корневой путь усвоения радиостронция из кумулятивных запасов радионуклидов в почвах.

Поглощение растениями радиоактивных продуктов деления из почвы зависит от таких ее свойств, как механический и минералогический состав, химизм, количество гумусовых веществ и т. д. Приведем для иллюстрации лишь пример воздействия физических свойств почвы на накопление радионуклидов растениями. В одном из опытов в зерне овса, выращенного на супесчаной дерново-подзолистой почве, содержание стронция-90 оказалось в 4 раза выше, чем на суглинистой, и в 36 раз выше, чем на черноземе, хотя во всех трех типах почв содержание стронция было одинаково. При низких концентрациях радиостронция в почвах его накопление в сельскохозяйственной продукции почти прямо пропорционально степени загрязнения территории этим радионуклидом.

Радионуклиды стронция и цезия интенсивно поступают в растения и в значительных количествах накапливаются в вегетативных органах, а иногда и в семенах. В то же время Zr^{95}, Ru^{106}, Ce^{144}, Y^{91} сравнительно слабо поглощаются растениями и в очень малых количествах поступают в надземные части. Еще слабее поглощается из почвы такой опасный продукт атомного производства, как плутоний-239, который к тому же почти целиком задерживается корневой системой. Но плутоний-239 может накапливаться в растениях за счет поступления через листву. Так, в 1960 г. в ФРГ концентрация этого нуклида в сене достигла $1{,}2 \cdot 10^{-11}$ *кюри/кг* за счет глобальных выпадений. Интересно, что при поглощении

из почв или питательных растворов, а также при передвижении внутри растения может происходить разделение генетически связанных в цепочке нуклидов радиоактивного распада, если они относятся к разным элементам. Это показано на примере пары Sr^{90}—Y^{90}. Изотопы одного элемента при этом не разделяются.

Радиоактивные изотопы, выпадающие в виде слабо растворимых соединений, плохо аккумулируются растительностью и всасываются в желудочно-кишечном тракте сельскохозяйственных животных, а хорошо растворимые соединения относительно легко включаются в биологический круговорот веществ.

Коэффициенты концентрации продуктов радиоактивного распада

Способность организмов накапливать радионуклиды выражается коэффициентами концентрации, в которых выражено отношение содержания радиоизотопа в растении или животном к его содержанию в питательном растворе, пище или среде обитания. Если коэффициент концентрации больше 1, происходит накопление радионуклида, если меньше — его дискриминация. Коэффициенты концентрации могут изменяться в зависимости от физико-химических условий среды, возраста организма, особенностей его питания и других причин.

Растения на суше могут накапливать радиоактивные элементы в концентрации на 2—4 порядка выше, чем их содержание в питательном растворе. Очень большие количества некоторых радионуклидов способны накапливать водоросли; известны случаи, когда их активность в 7—10 тыс. раз превышала активность воды, в которой они обитали. Еще больше радиоактивных веществ накапливают животные-фильтраторы; например, устрицы аккумулировали в своих тканях в 200 тыс. раз больше цинка-65, чем была его концентрация в морской воде.

У наземных животных резко проявляется закономерность уменьшения коэффициента концентрации по мере увеличения размеров организмов. Хищники, переваривающие скелет жертв, могут накапливать стронция-90 в 10 раз больше на единицу веса, чем у их жертв, и в 300 раз больше, чем содержится радионуклидов в растительности.

Коэффициенты концентрации показывают, что у водных животных количество накопленных радионуклидов превышает в сотни и тысячи раз содержание их в воде. Для сухопутных животных коэффициенты концентрации невелики.

Биологически значимые элементы (например, фосфор) аккумулируются животными в большей степени, чем второстепенные.

Распределение продуктов радиоактивного распада в организме

Свойства радиоактивных изотопов и их биологическая значимость определяют распределение их по органам и тканям животных. Наибольшее количество радиоактивных изотопов стронция и кальция (до 90% всего аккумулированного организмом элемента) накапливается в скелете. Цезий-137 откладывается главным образом в мышцах и внутренних органах. Радиоактивные фосфор и сера распределяются в организме относительно равномерно. Печень и почки являются местами локализации кобальта-60, а радиоактивный йод-131 депонируется исключительно в щитовидной железе. Уран-238 откладывается в мягких тканях в значительно больших количествах, чем в скелете животных.

Внутри ткани депонированный радионуклид распределяется неоднородно. Например, стронций-90 в кости образует очаги с очень высокой концентрацией, которые носят название горячих пятен.

Выведение продуктов радиоактивного распада из организма животных

Радиоизотопы, отложенные в костной ткани, выводятся медленно, а распределенные в организме более или менее диффузно, убывают равномерно из всех тканей. Скорость выведения радионуклидов из органов и тканей животных зависит от интенсивности обмена веществ и физико-химических свойств радиоизотопов. Она определяется периодом биологического полувыведения — временем, за которое активность изотопа, накопленного в организме, уменьшается вдвое (рис. 3). Процесс выведения радионуклидов из организма разных видов животных длится неодинаковое время. Например, для белых крыс биологический период полувыведения цезия-137 равен 6,5 дня, а для кроликов — 23—25 дням.

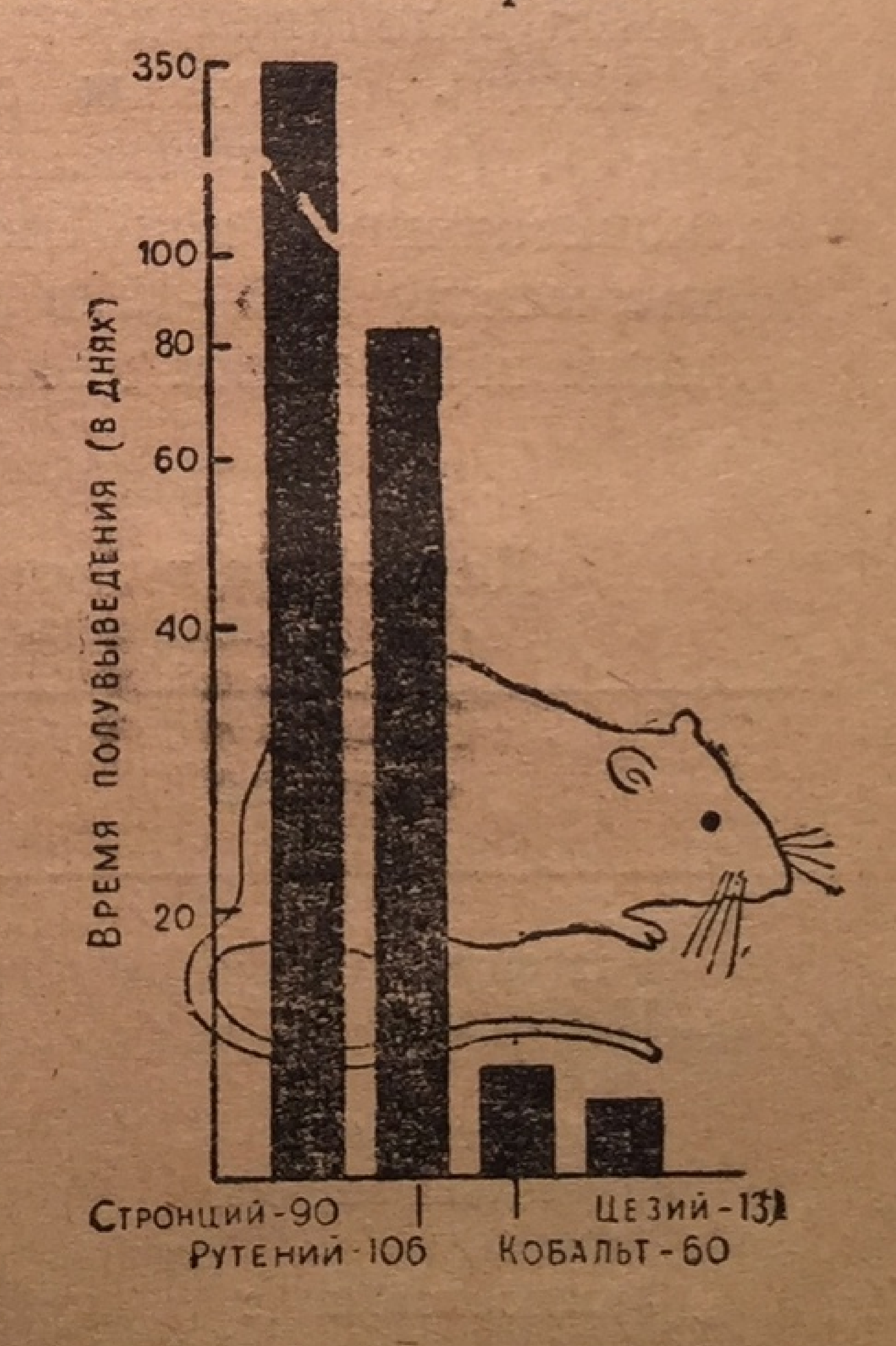


Рис. 3. Скорость полувыведения разных радионуклидов из организма белых крыс.

Цезий сравнительно быстро и примерно с одинаковой скоростью выделяется из мягких тканей и скелета животных: через 32 дня после поступления содержание цезия-137 в мягких тканях и скелете незначительно (0,02—0,6%). Интересно, что

у кроликов половина накопленного цезия-137 выводится за первые 23—25 дней, а оставшаяся часть — только за последующие 4 месяца.

Время, в течение которого организм освобождается от половины депонированного в нем радионуклида за счет биологического полувыведения и физического распада радиоизотопа, называется эффективным периодом полувыведения. Для долгоживущих радионуклидов эффективный период полувыведения зависит только от биологического периода полувыведения, а для короткоживущих главным образом от скорости радиоактивного распада изотопа. Выведение радиоактивных изотопов из взрослых млекопитающих происходит более энергично, чем из молодых.

Радиочувствительность

Как правило, чем проще организован организм, тем ниже его радиочувствительность, которая особенно низка у бактерий. Известны случаи, когда бактерии жили в воде охлаждающего контура атомных реакторов. Радиочувствительность растений в самых общих закономерностях ниже, чем у животных, но и среди растений есть крайне чувствительные к ионизирующей радиации виды, например, сосна, не намного отличающаяся в некоторые периоды жизни по этому показателю от человека. Степень чувствительности животных определяется величиной дозы ионизирующей радиации, вызывающей гибель половины облученных животных за 30 дней ($LD_{50/30}$). Полулетальная доза рентгеновых и γ-лучей для млекопитающих, наиболее радиочувствительных животных, лежит между 200—1500 *рад*. Наиболее устойчивы к ионизирующим излучениям насекомые (табл. 3).

Таблица 3

Дозы гамма и рентгеновых лучей, вызывающие гибель половины облученных за 30 дней

Организмы	Полулетальная доза
Растения	1000—150 000
Насекомые	1000—100 000
Рыбы	670—3500
Земноводные	700—3000
Пресмыкающиеся	300—400
Птицы	400—670
Млекопитающие	200—500

Очень часто даже близкие виды животных по непонятным причинам резко отличаются по радиочувствительности. Имеются определенные возрастные отличия в радиочувствитель-

ности животных. Например, трехчасовые эмбрионы дрозофилы погибают при дозе в 170—200 *рад*, пятичасовые — при 500 *рад*, а эмбрионы в возрасте семи с половиной часов — при 810 *рад*. Куколки дрозофилы гибнут при дозе 2800 *рад*, а взрослые мушки — только при 85 000 *рад*.

Интересно, что некоторые виды млекопитающих, живущие в суровых условиях пустынь, значительно более устойчивы к ионизирующим излучениям по сравнению с млекопитающими из других ландшафтных зон. Поэтому при облучении биоценоза и популяции от внутренних и внешних источников в разных географических районах биологическое действие радиации будет неодинаковым. Более устойчивы к действию радиации и животные, обитающие на территории геохимических провинций с повышенным содержанием в почве естественных радиоактивных элементов: урана, радия, тория.

Можно ожидать, что более высокой радиоустойчивостью будут отличаться и многие виды высокогорных животных и растений, ибо в процессе эволюции им пришлось долгое время обитать в условиях значительно более высокого фона космического излучения.

Ионизирующие излучения поражают сильнее всего интенсивно размножающиеся клетки или же клетки с крупными ядрами и хромосомами. Видимо, немалую роль в радиочувствительности играет и степень интеграции, а также уровень организации нервной системы, так как замечено, что более высокоорганизованные в этом отношении животные являются и более радиочувствительными.

РАДИОЭКОЛОГИЯ ПОПУЛЯЦИЙ

Накопление радионуклидов популяцией животных в зависимости от местных условий

Радиоактивные вещества неравномерно загрязняют поверхность суши даже на ограниченных участках. Рельеф местности, наличие лесов, водоемов, изрезанность опушек и т. п. существенно влияют на количество оседающих радионуклидов, переносимых ветром в виде аэрозолей.

При локальных аварийных выбросах наибольшие уровни загрязнения отмечены в понижениях рельефа, с наветренной стороны опушек леса или строений. Если принять за единицу степень загрязнения ровного задернованного участка почвы при прохождении радиоактивного облака, то на наветренной опушке леса степень загрязнения составит 2,8, в лесу — 1,4, на пашне — 0,3, а на асфальтовом шоссе — 0,05.

Продукты радиоактивного деления из глобальных выпадений больше всего осаждаются в местах с повышенным количеством атмосферных осадков и на возвышенностях. При выпадении осколков деления со снегом обнаруживают более высокие уровни радиоактивности почвы в местах зимних ветровых наносов. Естественно, что с наветренной стороны плотность осаждения радиоактивных элементов будет выше, чем с подветренной.

Величина накопления радионуклидов популяциями при загрязнении продуктами радиоактивного деления небольших участков определяется размерами индивидуальных кормовых участков животных. На местах захоронений радиоактивных отходов в США мелкие животные — мыши и крысы — концентрировали намного большее количество радиоизотопов, чем калифорнийские зайцы, у которых индивидуальные участки были значительно больших размеров.

Возрастная и половая структура популяции и накопление продуктов радиоактивного распада. Сезонные изменения в концентрации радионуклидов

Популяция животных одного вида состоит из разных возрастных и половых групп. В силу физиологической разнокачественности организмов, входящих в эти группы (она выражается в различиях солевого и водного обмена, а также различий интенсивности обмена веществ), имеются отличия и в накоплении радионуклидов.

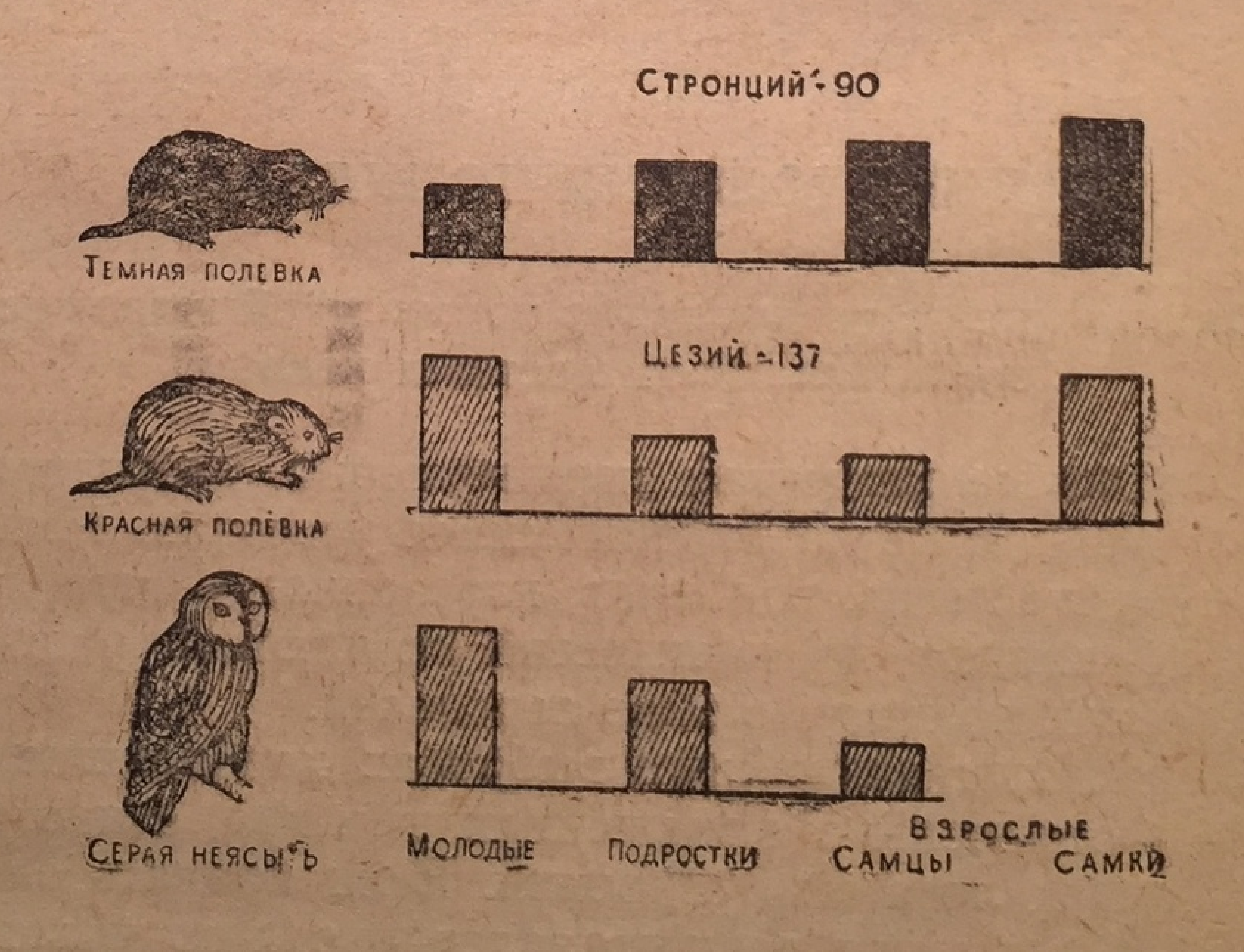


Рис. 4. Возрастные и половые различия в концентрации стронция-90 в системе и цезия-137 в теле животных.

В естественных популяциях мелких млекопитающих и птиц, обитающих на участках, локально загрязненных радиоактивными стронцием и цезием, также найдены различия в концентрации этих радионуклидов разными возрастными группами животных (рис. 4). Половые различия в накоплении радиоизотопов в популяциях животных найдены только в период размножения, когда у самок значительно изменяются интенсивность и характер обмена во время беременности и лактации.

Интереснейшие данные по сезонным изменениям содержания радионуклидов получены в тундрах Аляски для северных оленей и оленей карибу. В мышцах оленей больше всего радионуклидов зимой, когда они питаются в основном лишайниками, хорошо сорбирующими изотопы из воздуха. Летом при переходе на питание травой и ветвями кустарников концентрация радионуклидов падает.

Действие депонированных в организме радиоактивных изотопов и ионизирующих излучений на популяцию

В популяциях при воздействиях на них ионизирующих излучений от депонированных особями радионуклидов или от внешних источников, возникают изменения в продолжительности жизни, плодовитости и других показателях. Даже сравнительно небольшие дозы стронция-90 увеличивают смертность животных в популяции. Содержание в воде 10^{-5} *кюри/л* стронция вызывало быструю гибель пресноводных рачков-дафний. Из населения рыб оз. Уайт-Ок в США, загрязненном продуктами радиоактивного распада, очень быстро исчез ушастый окунь, кроме того, продолжительность жизни всех видов рыб уменьшилась по сравнению с длительностью жизни этих видов в незагрязненных водоемах.

Известны случаи, когда при облучении леса γ-лучами при ежедневной дозе 50 *рад* отмечалась гибель птиц. Подобно этому на участках, загрязненных стронцием-90 с плотностью 1,8—3,4 *милликюри/км*^{2}, обнаружена повышенная смертность в популяциях лесных грызунов (рис. 5). Косвенным показателем ослабле-

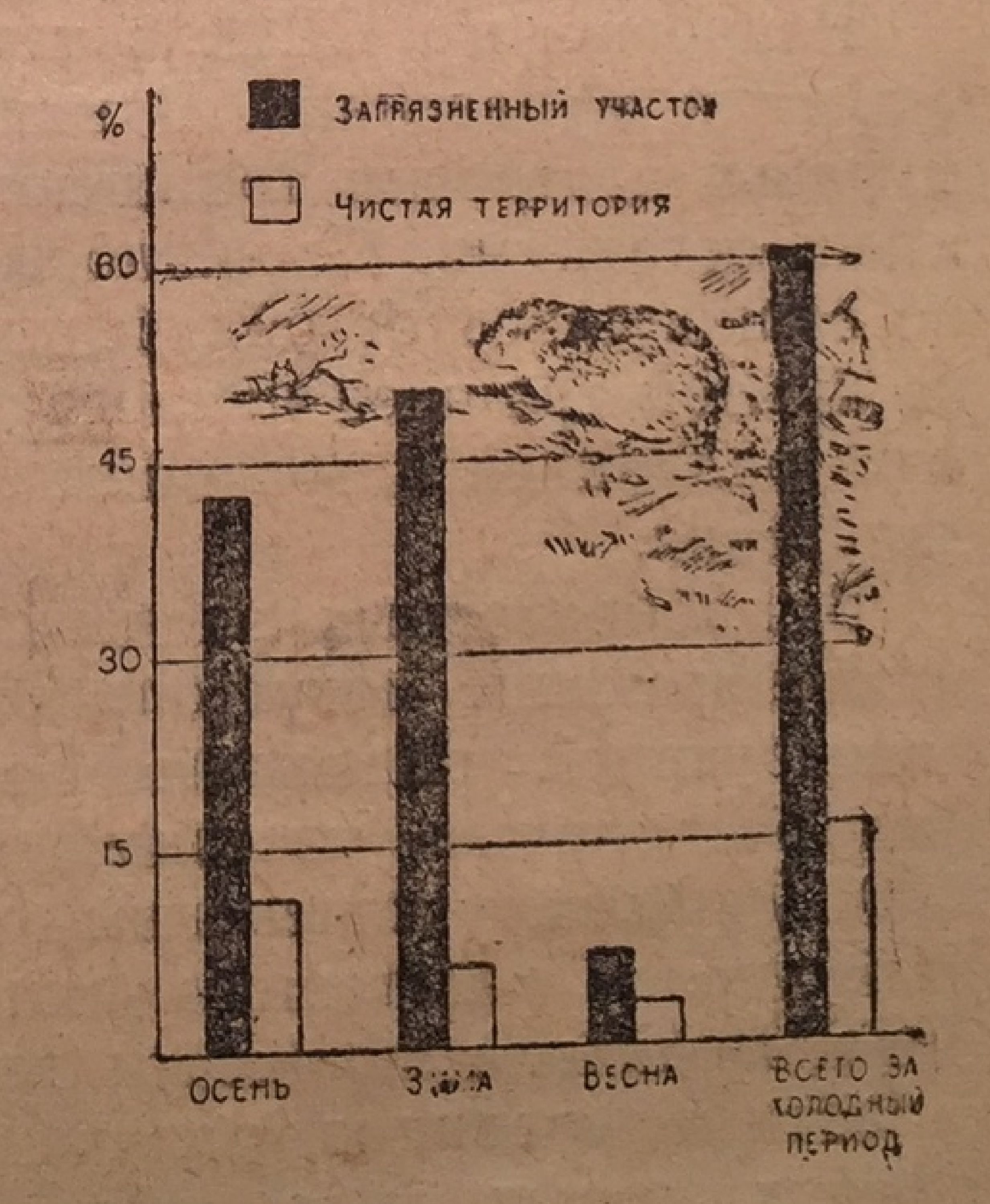


Рис. 5. Величина смертности в популяции грызунов на загрязненном стронцием-90 участке в разные периоды.

нных особями радионуклидов или от
зникают изменения в продолжительно-
и и других показателях. Даже сравни-
стронция-90 увеличивают смертность
. Содержание в воде 10^{-5} *кюри/л*
трую гибель пресноводных рачков-
и рыб
загряз-
дпоак-
быстро
кроме
жиз-
еньши-
литель-
в в не-

когда
лучами
50 *рад*
д. По-
ах, за-
-90 с
илкю-
вышен-
ляциях
). Кос-
слабле-

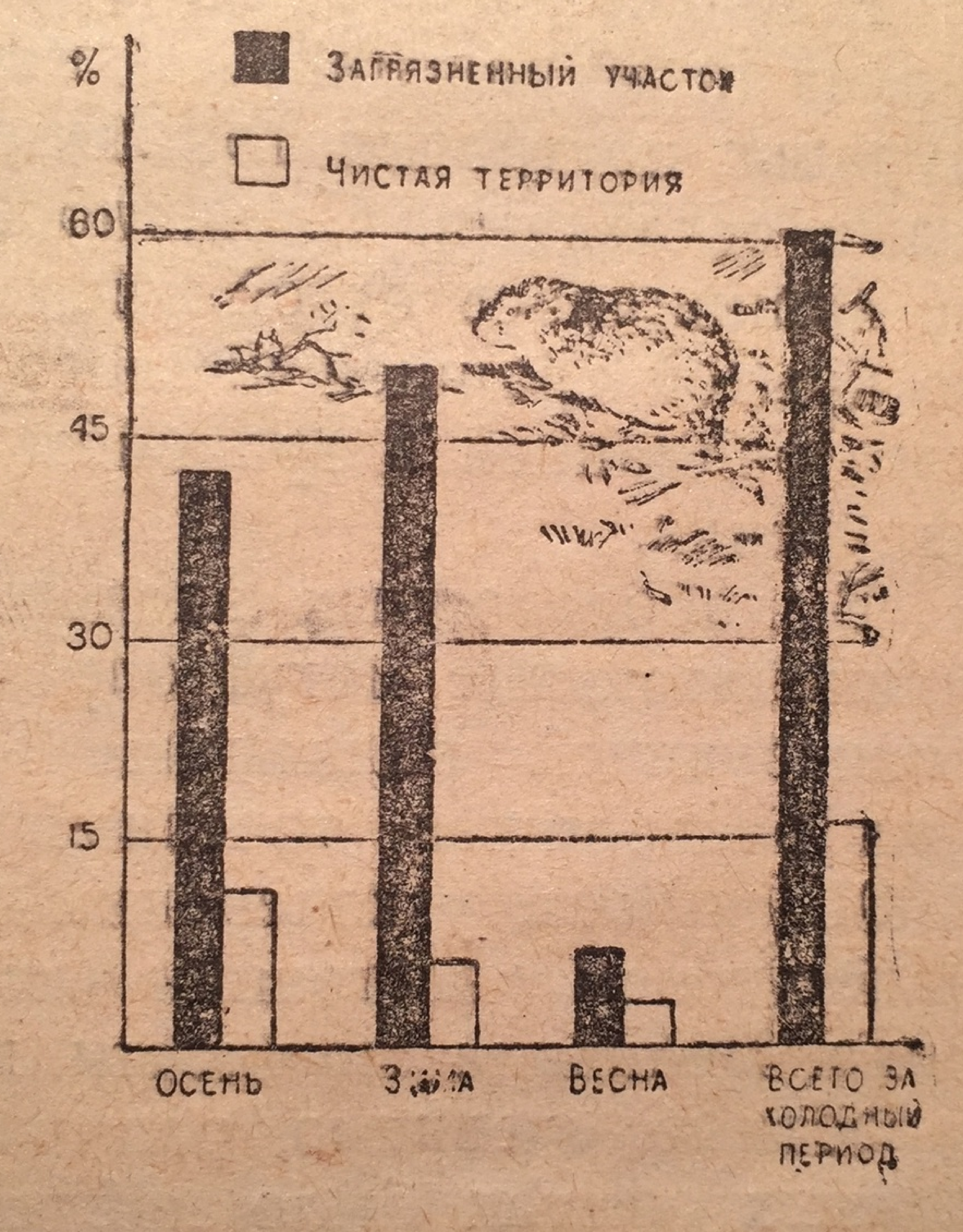


Рис. 5. Величина смертности в популяции грызунов на загрязненном стронцием-90 участке в разные периоды.

накоплении радионуклидов.

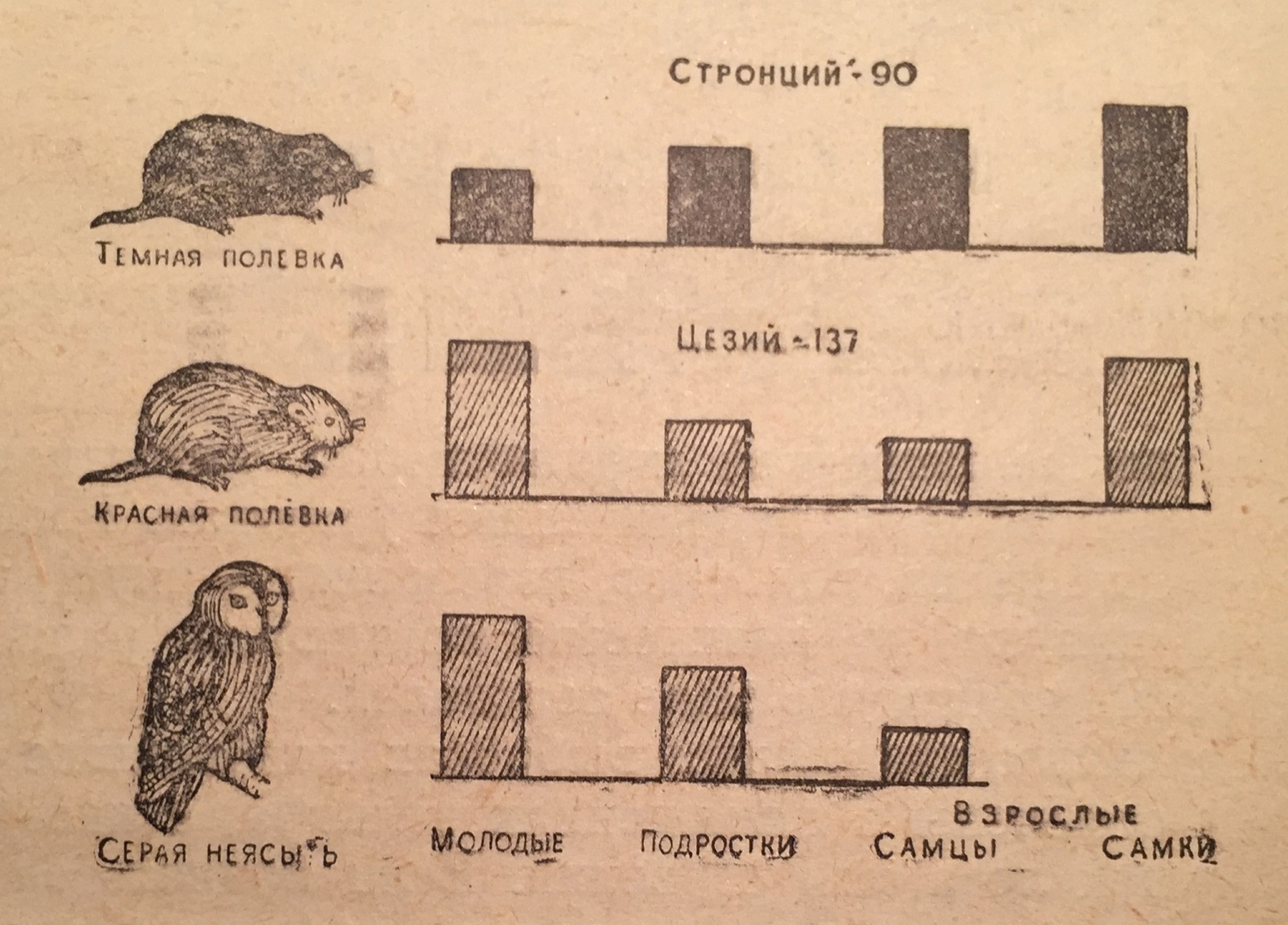


Рис. 4. Возрастные и половые различия в концентрации стронция-90 в системе и цезия-137 в теле животных.

ния животных в результате постоянного воздействия ионизирующих излучений может служить величина смертности особей в популяции при действии на нее неблагоприятных явлений или переживание особенно суровых периодов года. Для грызунов таким периодом в условиях СССР является зима, и именно в это время года в пораженной ионизирующей радиацией популяции полевок гибнет больше половины животных — значительно больше, чем в контроле.

Обычно у облученных животных снижается плодовитость, сокращается период размножения.

Высокие уровни загрязнения территории неблагоприятно действуют на растения, вызывая угнетение роста, быстрое старение, морфологические нарушения, иногда и исчезновение некоторых видов из биоценоза. Даже невысокие дозы облучения (3,5 *рад* за вегетационный период) неблагоприятно сказываются на развитии бобов, а концентрации урана и радия в рамере 10^{-2}—10^{-7}% вызывали задержку роста стебля и листьев, а также сокращение урожая.

Влияние ионизирующих излучений на поведение животных

Чувствуют ли животные ионизирующие излучения и могут ли их избегать?

Радиоэкологи США в течение нескольких лет облучали γ-лучами муравейник. В наиболее сильно облучаемом месте муравьи построили траншею, крытую различными растительными остатками. Сложилось впечатление, что они умышленно защищались от облучения, но полагают, что строительство крытой траншеи явилось результатом нарушения, вызванного радиацией в травяном покрове, а не прямым действием излучения.

В лабораторных экспериментах удалось установить, что млекопитающие могут определить местоположение источника ионизрующей радиации. Так, в специальных клетках, где был расположен точечный цезиевый источник мощностью 0,001 *рад/сек*, узкочерепные полевки строили свои гнезда на наибольшем расстоянии (которое было возможно) от источника. Величина мощности дозы, которую начинают избегать животные, очевидно, различна для разных видов. В лабораторных опытах было найдено, что морские свинки избегают дозу, равную 0,0017 *рад/сек*, крысы — 0,0127, а обезьяны — 0,008 *рад/сек*.

Облучение лесного биоценоза γ-лучами с средней дозой за 21 день 4308 *рад* вызвало у грызунов изменение в пове-

дении: снижение агрессивности и осторожности, повреждение двигательных рефлексов и равновесия, потерю ориентировки и общее сокращение подвижности. Даже в чисто практических целях необходимо иметь в виду глубокое воздействие излучений на поведение животных. Например, домашние животные, получившие определенную дозу ионизирующей радиации, ведут себя иначе, чем мы это привыкли видеть, а стада облученного скота могут стать неуправляемыми.

Изменчивость в популяциях животных на участках с повышенным фоном ионизирующей радиации

Популяция — это низшая эволюирующая единица живой природы, а изменчивость — показатель лабильности популяции, интенсивности и направления естественного отбора.

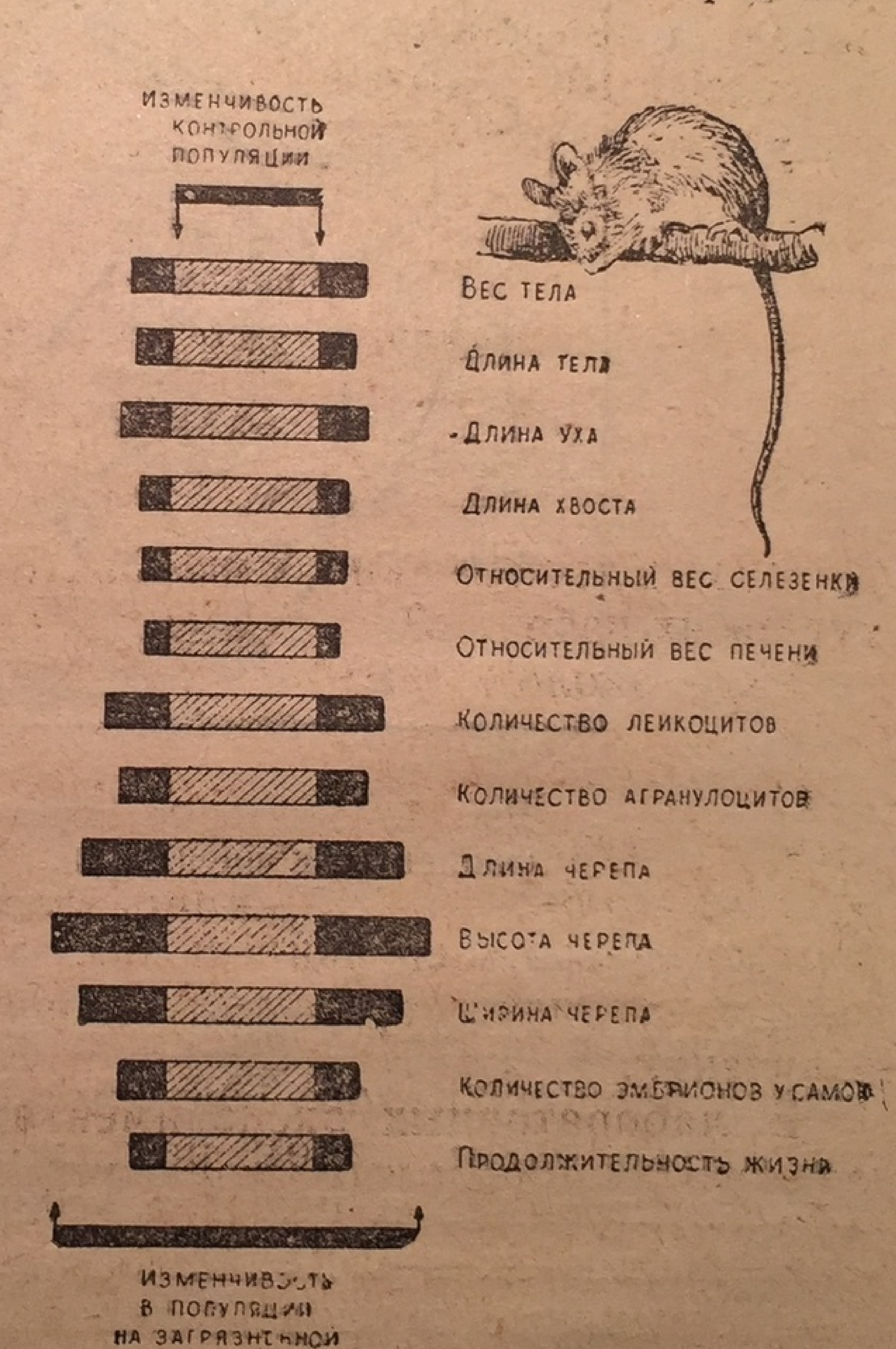


Рис. 6. Изменчивость морфологических и популяционных признаков в популяции грызунов на территории, загрязненной продуктами радиоактивного распада.

Продукты радиоактивного распада, рассеянные в биоценозе и аккумулированные животными, вызывают увеличение изменчивости различных признаков у особей в популяции (рис. 6). Можно ожидать, что ионизирующие излучения при продолжительном воздействии на популяцию могут иметь для нее определенное эволюционное воздействие.

ции, [illegible] естественного отбора.

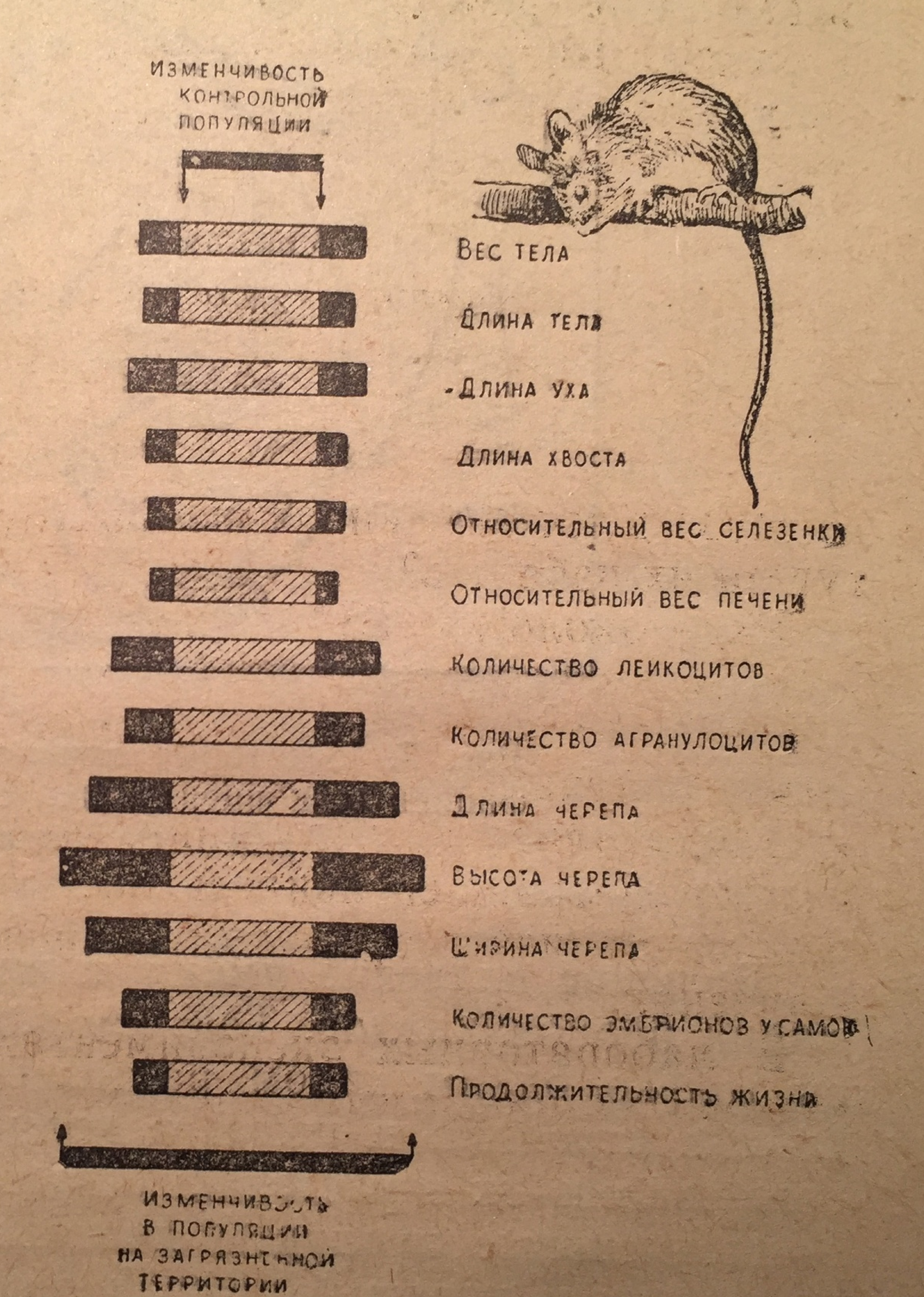


Рис. 6. Изменчивость морфологических и популяционных признаков в популяции грызунов на территории, загрязненной продуктами радиоактивного распада,

Продукты радиоактивного распада, рассеянные в био[illegible]

РАДИОЭКОЛОГИЯ СООБЩЕСТВ

Радиоактивные вещества, попавшие в биосферу в результате атомных взрывов, сброса промышленных отходов, аварий и т. п., включаются в биологический круговорот веществ. Если их активность и период полураспада значительны, то при определенном уровне аккумуляции они вызовут изменения в биоценозе. Так как радионуклиды распределяются неоднородно по компонентам ландшафта и избирательно накапливаются отдельными видами, то и действие радиации на биоценоз приведет к разной реакции отдельных видов.

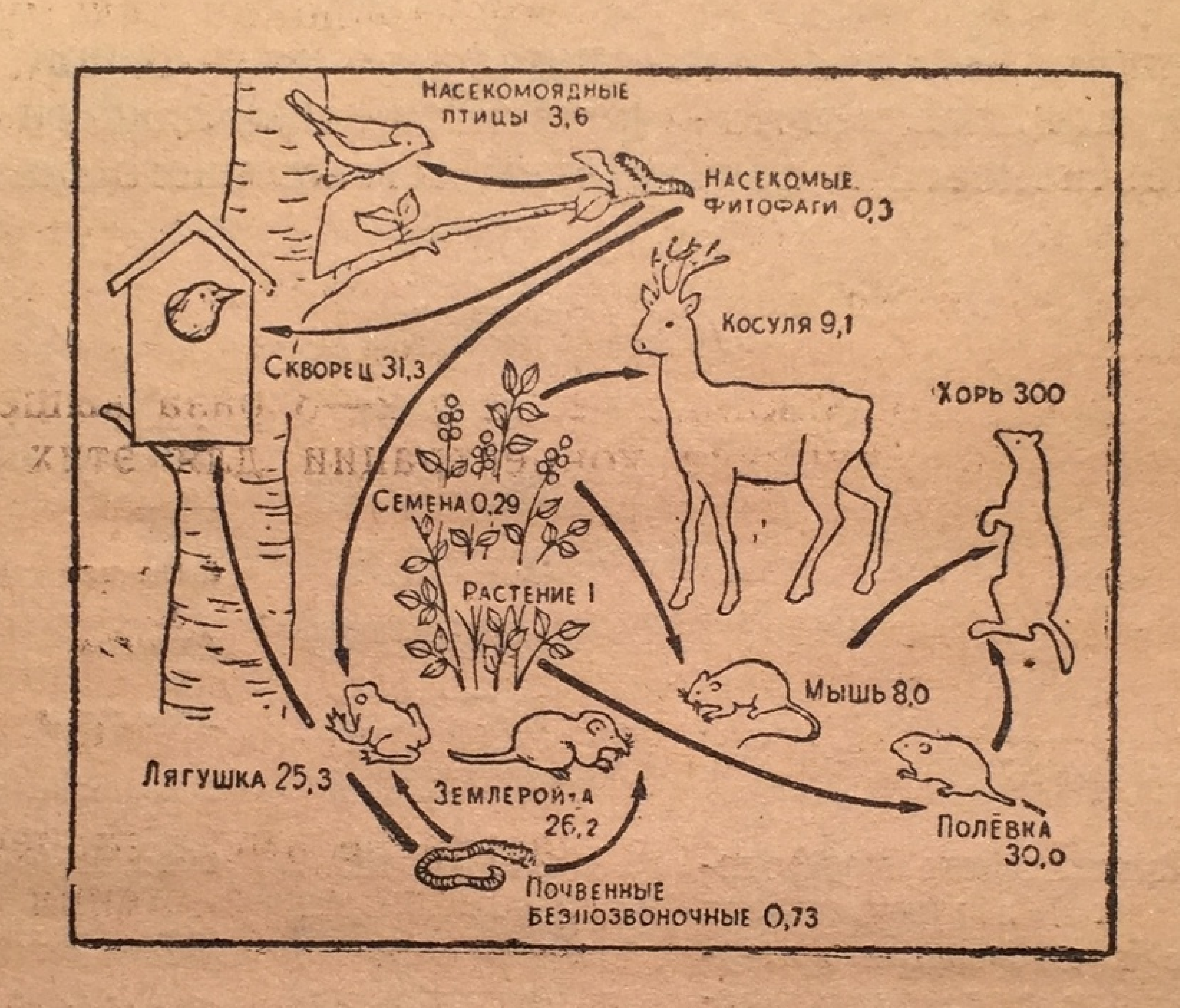


Рис. 7. Некоторые пищевые связи и коэффициенты концентрации стронция-90 в сообществе животных.

Большое значение имеют и видовые различия в аккумуляции радионуклидов. Так, насекомые монофаги (питающиеся только одним видом растений) концентрируют радиоактивные стронций и цезий в количествах, пропорциональных содержанию их в растениях, служащих им источником пищи. Радиоактивные продукты деления в биоценозах мигрируют по пищевым цепям. Пищевая цепь редко состоит более чем из пяти звеньев: растения → животные-фитофаги → хищники— в цепь включаются паразиты, а также животные и микроорганизмы, потребляющие мертвые органические остатки растительного и животного происхождения (рис. 7).

В первом звене пищевых цепей, при переходе стронция-90 от растений к растительноядным животным, в сухопутных биоценозах наблюдается увеличение его концентрации.

ри определенном уровне аккумуляции они вызовут измен
ия в биоценозе. Так как радионуклиды распределяются н
днородно по компонентам ландшафта и избирательно н
апливаются отдельными видами, то и действие радиац
а биоценоз приведет к разной реакции отдельных видо

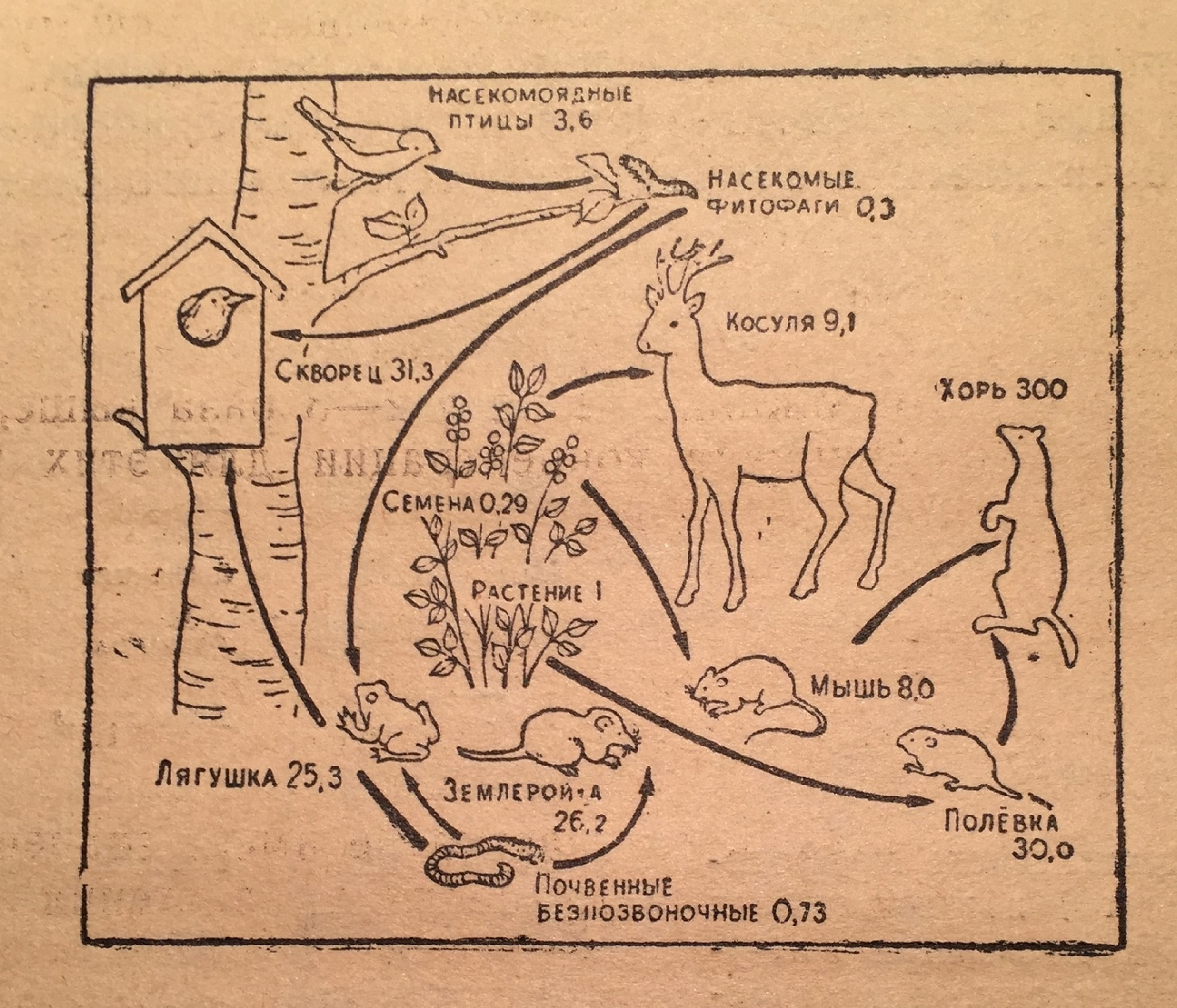


Рис. 7. Некоторые пищевые связи и коэффициенты концентрации стронция-90 в сообществе животных.

Большое значение имеют и видовые различия в акку
ции радионуклидов. Так, насекомые монофаги (питающ
только одним видом растений) концентрируют радио
вные стронций и цезий в количествах, пропорциональн
держанию их в растениях, служащих им источником пи
диоактивные продукты деления в биоценозах мигриру
пищевым цепям. Пищевая цепь редко состоит более
пяти звеньев: растения → животные-фитофаги → хищник

В противоположность этому количество цезия-137 здесь уменьшается. В следующем звене пищевой цепи при миграции стронция из тела растительноядных животных к хищным млекопитающим коэффициенты концентрации увеличиваются как для стронция-90, так и для цезия-137. Это показывает, что идет концентрирование радионуклидов по мере увеличения количества звеньев пищевой цепи. Но на накопление радиоизотопов влияют и многие особенности питания животных. Например, концентрация стронция-90 в костях хищников намного ниже, чем у грызунов, которыми они питаются, так как скелет своих жертв они не переваривают. Таким образом, хищные млекопитающие аккумулируют стронций-90 только из мягких тканей съедаемых ими животных. Цезий-137 концентрируется в большом количестве в мягких тканях, из которых легко переходит в тело хищных млекопитающих, поэтому концентрация цезия-137 при переходе от жертвы к крупным хищным животным увеличивается. На Аляске в теле россомах и волков, которые питаются оленями карибу, содержание цезия в 2—3 раза выше, чем в мясе оленей. Коэффициент концентрации для этих хищников равен 2,5 и 4,5.

Интересно, что у хищных рыб благодаря особенностям пищеварения проглоченная жертва переваривается целиком вместе со скелетом и чешуей. Поэтому в теле хищных рыб заметно увеличивается концентрация как стронция-90, так и цезия-137.

Если размер пораженного участка не имеет значения для расчета эффекта действия загрязнения на растения, то для подвижных крупных животных это обстоятельство существенно. Животные с большими индивидуальными участками (лоси, медведи, волки, орлы и т. д.) будут относительно мало контактировать с пораженными участками и потреблять немного загрязненного радионуклидами корма. Мелкие животные, такие, как грызуны, насекомоядные, некоторые птицы, многие насекомые, обитающие на загрязненных территориях, постоянно находятся в загрязненном биоценозе и потребляют загрязненную пищу, во всяком случае в период выведения потомства. Но в связи с неравномерностью выпадения радионуклидов на суше перечисленные животные в пределах своего индивидуального участка сталкиваются с разными уровнями загрязнения. Наконец, самые мелкие животные, главным образом почвенные (дождевые черви, личинки насекомых, многоножки, микроартроподы), обитающие на очень ограниченной площади, часто не более одного квадратного метра, испытывают воздействие даже самых незначительных колебаний в степени загрязнения почвы.

Таким образом, в пределах одного наземного биоценоза могут оказаться виды животных, сильно различающиеся по

степени контакта с загрязненными участками, а следовательно, и с ионизирующим излучением. По этому признаку различают животных, случайно контактирующих с загрязнением, временно или постоянно. Несколько слов следует сказать о случайно и временно контактирующих животных.

Большую опасность в этом отношении представляют многие виды водоплавающих охотничье-промысловых птиц, например уток. На пролете или в период гнездования они могут остановиться на ручьях или озерах, в которые сбрасывают радиоактивные отходы атомного производства (такие водемы есть в США, Канаде и других странах). В этом случае в пищу может попасть птица, которая накопила большое количество радионуклидов не только за сотни, но даже и за тысячи километров от места ее добычи охотником.

Радиационное поражение наземного биоценоза приводит к ослаблению входящих в него видов. Следствием этого ослабления является большая пораженность животных эктопаразитами, например, млекопитающих — блохами и клещами-кровососами. В свою очередь, повышенная интенсивность поражения кровососами вместе с ослаблением иммунитета животных создает благоприятные условия для широкого распространения очагов трансмиссивных и других природноочаговых болезней и к оживлению циркуляции вируса в существовавших очагах. Так как к природноочаговым болезням относятся такие, как чума, клещевой энцефалит, клещевой сыпной тиф и другие тяжелейшие болезни человека, надо иметь в виду и этот аспект действия радиации на естественные биоценозы. Изменения в пораженном радиацией биоценозе испытывает не только животное население, но и растительность.

После взрыва американцами термоядерной бомбы в районе нескольких коралловых рифов около Маршалловых островов в 1954 г. в растительном покрове атоллов через год-два не было замечено серьезных изменений. Но более поздние (а может быть, и более тщательные) исследования позволили выявить множество патологических изменений отдельных растений — гибель, усыхание верхушек, хлороз, потеря листвы — и полное исчезновение некоторых видов.

Ослабленные в результате действия ионизирующей радиации растения сильнее поражаются вредителями.

Поглощение радионуклидов растениями во многом зависит от свойств почвы и химических особенностей тех соединений, в состав которых входит радиоизотоп. Многие радионуклиды, например, цезий-137 и радиостронций, постепенно рассеиваются в биоценозе, захватывая все больше его компонентов. Радиоизотопы в почве поглощаются растительностью и животными, перемещаются вниз по почвенному профилю в направлении движения воды, мигрируют в горизонтальном

направлении и разными путями поступают в пищу человека. Но количество радиостронция в почве уменьшается главным образом не за счет рассеивания, а ввиду «потерь» от радиоактивного распада. В обычных условиях содержание радионуклидов в почвах незначительно. В верхнем слое почв Ленинградской области в 1956—1960 гг. содержание стронция-90 колебалось в пределах от 2 до 8,3 *мккюри/км*^{2} (от 20 до 53,4 стронциевых единиц), в других районах эта величина может достигнуть 15—17 *мккюри/км*^{2}. Радиоактивность, создаваемая естественными радионуклидами, значительно выше.

Закономерности миграции и накопления радионуклидов на суше, в морях и пресных водах во многом отличаются. Изучение радиоэкологии морских организмов особенно актуально в связи с большой площадью акватории Мирового океана (более чем в 2 раза превышающей площадь суши) и поступлением сюда огромных количеств радионуклидов, а также ввиду добычи в морях массы продуктов, поступающих непосредственно в пищу человека. К ноябрю 1958 г. по некоторым данным в моря и океаны попало $5 \cdot 10^6$ *кюри* стронция-90 против $1,8 \cdot 10^6$ *кюри* на суше, но другие исследователи считают и эти величины заниженными.

Особенностью поведения радиоизотопов в море является ограниченное действие внешнего излучения на растения и животных, быстрое рассеивание и разведение поступающих радионуклидов в огромных массах воды. При этом течения и массовые миграции организмов способны перемещать большие количества радионуклидов на тысячи километров.

Высокие концентрации радионуклидов в морской воде таят угрозу подрыва воспроизводства рыбных запасов и изменения структуры биоценозов открытого моря. Это касается, в частности, гипонейстона — сообщества морских организмов в поверхностном слое воды толщиной 0—5 *см*, в котором сосредоточена значительная часть планктонных организмов и пелагической икры рыб. При высоких уровнях загрязнения можно предвидеть вымирание отдельных видов, а также вспышку развития бактерий, микрофитов и радиоустойчивых животных, служащих пищей рыбам и другим организмам.

Для морских организмов наибольшую опасность представляют радиоизотопы церия и иттрия, а также радиостронций ввиду высоких уровней накопления и, следовательно, большой мощности облучения. При этом пищевой фактор передачи радиоизотопов имеет неизмеримо меньшее значение, чем непосредственное поступление из воды. Очень важны также радиоизотопы цинка, железа, кобальта, марганца и других элементов.

В морях к наилучшим концентраторам и биоиндикаторам цезия-137 относятся бурые и красные водоросли, мягкие ткани рыб и беспозвоночных; стронция-90 — радиолярии, кости

рыб и морских зверей, бурые водоросли; радиоизотопов иттрия — икра рыб, водоросли, ракообразные; церия-144 — водоросли, актинии и т. д.

В пресных водоемах большая часть выпавших радиоактивных осадков сорбируется донными отложениями и водной растительностью (рис. 8). Меньшая часть остается более или менее однородно растворенной в воде. Такое распределение радиоактивности приводит к тому, что рыбы, питающиеся донными формами беспозвоночных и растительностью, концентрируют большее количество радионуклидов, чем употребляющие в пищу планктонные организмы.

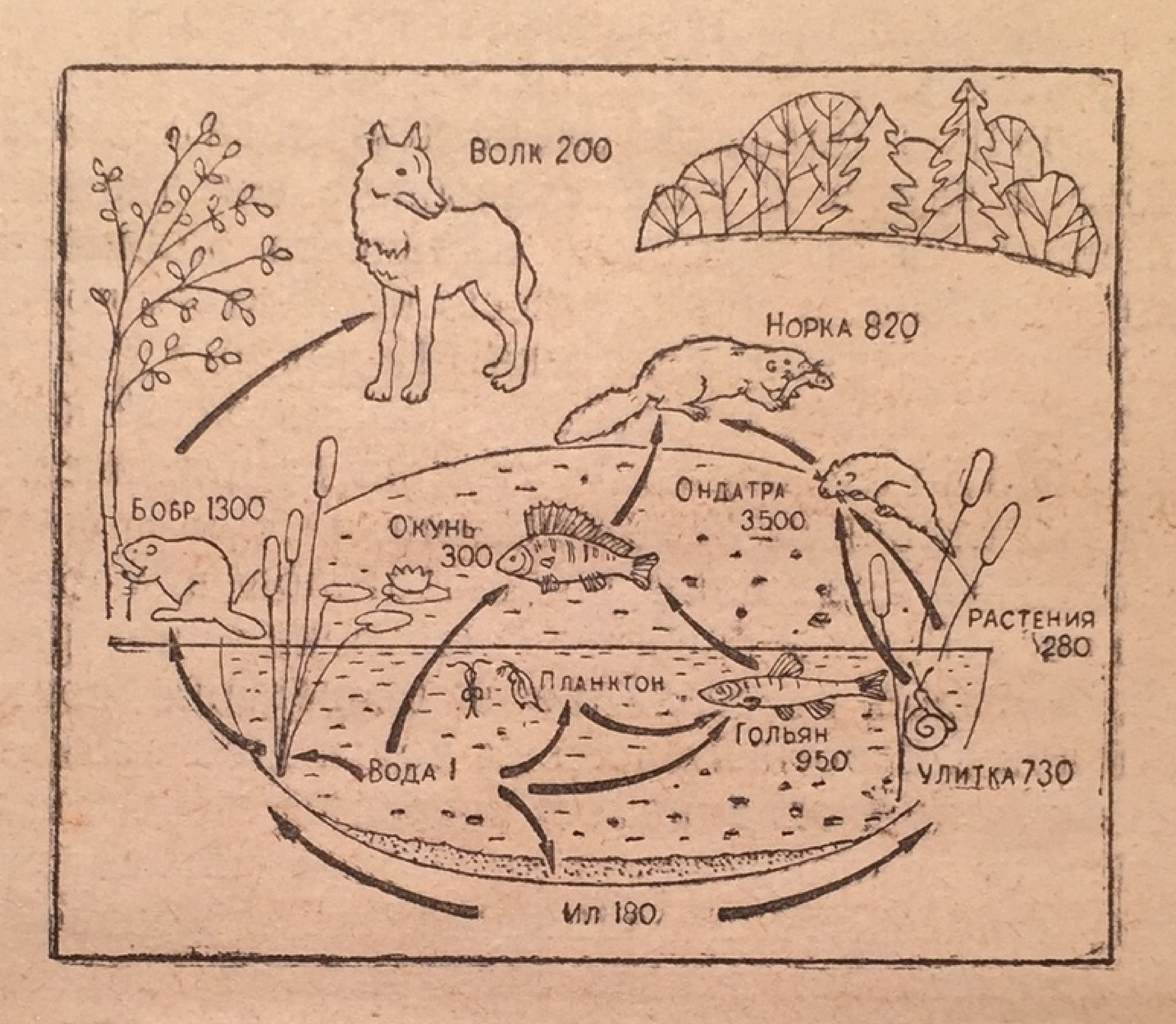


Рис. 8. Пути миграции и средние коэффициенты концентрации стронция-90 в пищевых цепях пресного водоема.

Зарегистрировано несколько случаев неблагоприятного воздействия радиоактивного загрязнения на население пресноводных водоемов.

В США донная фауна р. Анимас, ниже завода по переработке урановой руды, оказалась заметно обеднена на расстоянии 50—65 *км* из-за действия радия-226 и других радиотоксичных продуктов. Наиболее устойчивыми оказались водоросли, а из животных — личинки мух.

В Канаде очень интересные наблюдения проведены на небольшом оз. Перч, в которое впадает ручей, загрязняемый радионуклидами из жидких отходов атомного производства. Озеро интересно тем, что содержит богатый растительный и животный мир. За 5 лет в озеро поступило 4000 *мкюри* стронция-90, но 3000 из них было вынесено вытекающим ручьем,

В пресных водоемах большая часть выпавших радиоактивных осадков сорбируется донными отложениями и водной растительностью (рис. 8). Меньшая часть остается более или менее однородно растворенной в воде. Такое распределение радиоактивности приводит к тому, что рыбы, питающиеся донными формами беспозвоночных и растительностью, концентрируют большее количество радионуклидов, чем употребляющие в пищу планктонные организмы.

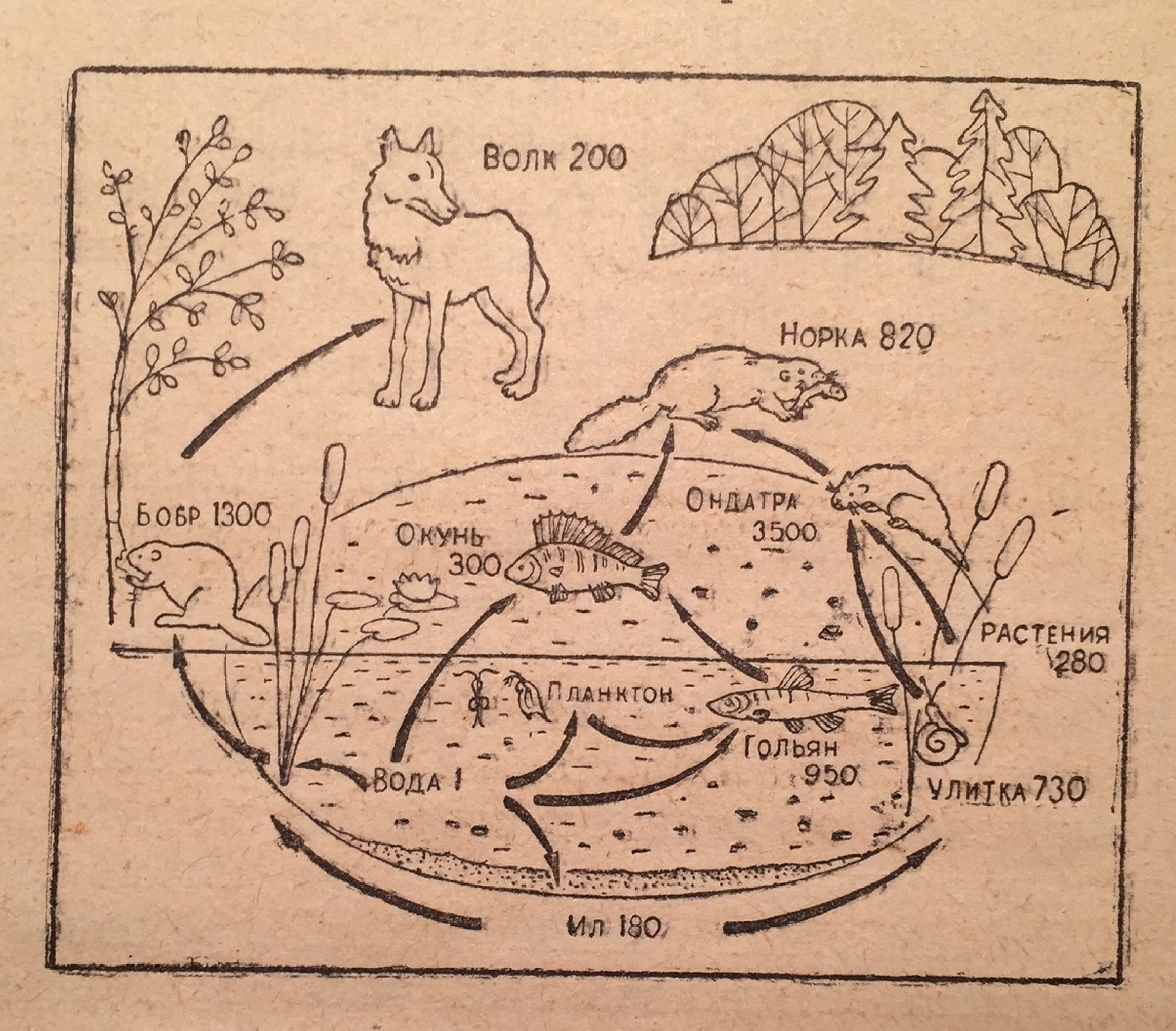


Рис. 8. Пути миграции и средние коэффициенты концентрации стронция-90 в пищевых цепях пресного водоема.

Зарегистрировано несколько случаев неблагоприятного воздействия радиоактивного загрязнения на население пресноводных водоемов.

В США донная фауна р. Анимас, ниже завода по переработке урановой руды, оказалась заметно обеднена на расстоянии 50—65 *км* из-за действия радия-226 и других радиотоксичных продуктов. Наиболее устойчивыми оказались во-

Из оставшихся 1000 *мкюри* активности 900 было аккумулировано в слое донных отложений толщиной 2,5 *см*, а довольно богатая водная растительность накопила всего 6 *мкюри*. Относительно много стронция-90 накопили рыбы. Так, в костях желтого окуня концентрация этого нуклида была в 3000 раз выше, чем в воде. Коэффициенты накопления, как правило, повышались по мере перемещения по пищевой цепи.

В лесных биоценозах количество радионуклидов неодинаково в лесной подстилке, травянистом покрове, кустарниках, стволах, ветвях и листьях деревьев. Поэтому насекомые, использующие в пищу растения различных ярусов лесного биоценоза, концентрируют разное количество радионуклидов, и при загрязнении местности радиоактивными веществами отдельные экологические группы беспозвоночных реагируют неодинаково. Перераспределению и ускорению рассеивания радиоактивных веществ способствует накопление их в растениях, отложение в спаде, а также деятельность животных. Загрязненные звери, птицы и насекомые могут мигрировать на значительные расстояния, а землерои (дождевые черви, кроты, суслики и др.) затаскивают загрязненную почву и растительные остатки с поверхности в глубокие горизонты. Почвенные животные, вынося на поверхность чистую почву из глубоких слоев, способствуют захоронению радиоактивных изотопов.

ЭВОЛЮЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ РАДИОЭКОЛОГИИ

Сильное биологическое действие ионизирующих излучений, заметные различия естественного радиоактивного фона и возможные изменения интенсивности космического излучения в прошлые геологические периоды привлекли внимание эволюционистов. Полагают, что атмосфера Земли и ее магнитное поле не всегда были такими, как сейчас. В частности, «озоновый экран», защищающий обитателей нашей планеты от ультрафиолетового излучения, является продуктом атмосферного кислорода, запас которого поддерживается главным образом благодаря жизнедеятельности зеленых растений. Если допустить, что в прежние геологические эпохи атмосфера была менее плотной, то придется признать несравненно более высокий фон ионизирующего излучения на поверхности Земли. Неоднократно возникали предположения, что за время существования жизни на Земле фон радиации повышался до уровней, губительных для некоторых форм жизни. В частности, повышением фона радиации пытались объяснить даже смены флор на земной поверхности в конце палеозоя и в период альпийского орогенеза. Причиной возрастания уровня радиации считали и вспышки «сверхновых» звезд.

Что можно сказать по поводу таких гипотез? Конечно, заманчиво, разрубив узел сложнейших вопросов, возникающих при решении проблем перестройки комплексов всего органического мира Земли в некоторые периоды, объяснить все действием радиации. Однако уже есть немало фактов, с которыми надо считаться.

Верно, что структура ценозов в результате радиационного поражения изменяется, так как радиочувствительные виды исчезают и их место занимают более стойкие формы. Верно и то, что радиация является сильным мутагенным фактором и есть наблюдения, будто бы свидетельствующие в пользу мнения о возникновении новых таксономических единиц в районах радиоактивного загрязнения.

В то же время несомненно, что подавляющая часть мутантов, возникших вследствие радиационного поражения среды, нежизнеспособна, а изменчивость организмов (которая служит признаком начала микроэволюционного процесса), отмеченная в местах с повышенным фоном радиации, не носит направленного характера. Нельзя не принять во внимание, что какова бы ни была интенсивность вспышки «сверхновой» звезды, эти объекты так далеки от нас, что излучение, убывая по мере удаления от источника пропорционально квадрату расстояния, едва ли может существенно повысить естественный радиационный фон. В десятки раз более высокие уровни естественной радиоактивности среды в некоторых районах, а также в высокогорьях нигде не привели к формированию новых флор и фаун.

Рассуждая логически, катастрофическое повышение фона космического излучения повлекло бы гибель в основном обитателей высокогорий, равнин и поверхностного слоя мирового океана. Остались бы пещерные формы, глубокопочвенные и жители абиссали. А как раз во всех перечисленных средах находят высокоспециализированных животных и растения, среди которых если и бывают формы, обладающие примитивными признаками, то это всегда лишь боковые ветви древних организмов, сохранившиеся в условиях более слабой биологической борьбы, а не формы, послужившие когда-то исходными для бурной адаптивной радиации[1]. Среди почвенных

---

[1] Вопрос о роли естественного фона радиации в эволюции жизни на Земле до сих пор не имеет ответа, опирающегося на точные проверенные факты. Предложено немало интересных гипотез, которые, однако, так же трудно доказать, как и опровергнуть. По-видимому, такое положение на современном уровне наших знаний является неизбежным, и остается пожелать лишь привлечения новых данных и поисков дальнейших путей для решения этой сложной, но важной и увлекательной проблемы. Взгляды авторов настоящей брошюры не являются поэтому общепризнанными; с другой точкой зрения можно ознакомиться в брошюре А. М. Кузина «Проблемы радиобиологии». М., «Знание», 1970.

обитателей именно жители самых поверхностных слоев наиболее разнообразны и содержат наибольшее число примитивных групп. В водной среде огромное большинство животных, сохранивших древние, примитивные признаки, — обитатели поверхностных слоев океана.

Одной из причин многих биологических последствий действия ионизирующего излучения являются нарушения жизненно важных ядерных структур и работы генетических элементов клетки. Поэтому в иерархии живых организмов по мере увеличения количества генетически важных структур, недублирующих друг друга функционально, радиорезистентность снижается, а дублирование функциональных единиц среди сходных организмов приводит к увеличению радиорезистентности.

Мутации, вызванные ионизирующим излучением, снижают эволюционную ценность генотипа, хотя возможно появление отдельных вариантов, увеличивающих жизнеспособность организма в гетерозиготном состоянии. Под действием радиации в исследуемом материале появляется большое количество леталей, полулеталей и других мутаций, снижающих жизнеспособность. Однако через несколько поколений, даже в условиях хронического облучения, популяция приспосабливается к действию радиации, а после прекращения ее действия очищается от вредных мутаций. Естественно, приспособление возможно к не катастрофически высокому фону радиации, а лишь к умеренному.

В одном из опытов дрозофил подвергли облучению рентгеновыми лучами в дозах 12—16 тыс. *рад*, после чего их выживаемость составила около 30% и только через 2—3 года повысилась до контрольного уровня. К этому же сроку восстановились прежний уровень жизнеспособности, частота леталей и полулеталей.

Дрозофилы были объектом генетического исследования и при изучении действия радиации во время термоядерных взрывов над атолом Бикини в 1954 и 1956 гг. Отмечено значительное поражение наследственных структур во всех пострадавших популяциях, причем жизнеспособность одной из них восстановилась только через 26 поколений.

В условиях повышенного фона ионизирующей радиации биоценозы претерпевают сильнейшие изменения, касающиеся их структуры и функциональных связей. Выпадение отдельных видов и перестройка структуры сообщества приводят к изменению биотических связей, в силу чего эти изменения затрагивают и радиорезистентные формы. Изменение характера биологического круговорота веществ и потока энергии ставит выжившие организмы перед необходимостью существовать в измененной обстановке. Мутагенное действие повышенного фона обеспечивает популяции мутациями, имеющими значе-

ние в повышении радиорезистентности, а естественный отбор способствует их закреплению в генотипе. Наиболее эффективный отбор радиорезистентных форм, вероятно, идет при некотором оптимальном уровне фона радиации.

Вопросы выработки радиочувствительности у организмов представляют большой интерес и с практической точки зрения. Могут же жить бактерии в воде защитных кожухов атомных реакторов, где дозы облучения достигают миллионов рентген. Возможно, что на отдельных участках Земли с сильным радиоактивным загрязнением будут успешно существовать ненужные или даже вредные для людей организмы.

Таким образом, применение ионизирующих излучений и загрязнение среды радионуклидами заставили человека столкнуться со многими новыми сложными проблемами. Задача радиоэкологов — решить эти проблемы и разработать научную основу поддержания в чистоте продуктов питания и среды обитания людей.

ЛИТЕРАТУРА

Алексахин Р. М. Радиоактивное загрязнение почвы и растений. М., Изд-во АН СССР, 1963.

Вопросы радиоэкологии. Сборник статей. М., Атомиздат, 1968.

Гиляров М. С., Криволуцкий Д. А. Радиологические исследования в почвенной зоологии. — «Зоологический журнал», 1971, т. 50, вып. 3, стр. 329—342.

Гулякин И. В., Юдинцева Е. В. Радиоактивные продукты деления в почве и растениях. М., Госатомиздат, 1962.

Передельский А. А. Основания и задачи радиоэкологии. — «Журнал общей биологии», 1957, т. XVIII, № 1, стр. 17—30.

Поликарпов Г. Г. Радиоэкология морских организмов. М., Атомиздат, 1964.

Соколов В. Е., Ильенко А. И. Радиоэкология наземных позвоночных животных. — «Успехи современной биологии», 1969, т. 67, вып. 2, стр. 235—255.

Тимофеев-Ресовский Н. В. Применение излучений и излучателей в экспериментальной биогеоценологии. — «Ботанический журнал», 1957, т. 42, № 2, стр. 161—194.

Шведов В. П., Широков С. И. Радиоактивные загрязнения внешней среды. М., Госатомиздат, 1962.

Эйзенбад М. Радиоактивность внешней среды. М., Атомиздат, 1967.

6 коп.

Индекс
70071